

УДК 621.575.9

Н. И. Мирмов¹, И. Н. Мирмов²¹Научно-инженерный центр (Государство Израиль)²Институт ядерных исследований РАН (Российская Федерация)**АБСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОХЛАЖДЕНИЯ**

Использование альтернативных источников энергии, а также применение отработанного тепла (вторичные источники теплоты) с целью экономии природных ресурсов и улучшения экологической ситуации является одним из основных направлений в современной энергетике. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы – наиболее перспективное направление использования вторичных источников теплоты.

Разработаны новые модели абсорбционных холодильных машин для получения отрицательных температур охлаждения. Проведены испытания рабочих моделей холодильных машин с рабочими растворами фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ и LiBr / CH₃OH. Раствор фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ позволяет получить в испарителе температуру кипения от –15 до –23°C, а в машинах с раствором LiBr / CH₃OH температура кипения в испарителе от –6 до –12°C. Коэффициент преобразования теплоты в холодильных машинах с холодильным агентом фреона-22 составил $\eta_{ht} = q_0 / q_h = 0,688–0,72$, а в машинах с холодильным агентом метанолом $\eta_{ht} = 0,82–0,85$.

Ключевые слова: абсорбционные холодильные машины, вторичные источники теплоты, рабочий раствор бромистый литий / метанол, фреон / органический абсорбент, коэффициент преобразования теплоты.

N. I. Mirmov¹, I. N. Mirmov²,¹Scientific-Engineering Center (State of Israel)²Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Science (Russian Federation)**ABSORPTION REFRIGERATION MACHINES
FOR OBTAINING OF THE COLD TEMPERATURES**

The use of alternative energy sources, as well the waste heat (secondary sources of heat) in order to conserve natural resources and improve the environment is one of the major trends in modern energetic industry. Absorption refrigeration machines and heat pumps are the most promising direction of secondary heat sources. The new models of absorption refrigeration machines are developed for receiving of the negative temperatures of cooling.

Conduct the tests of working models of refrigeration machines with working solutions of freon-22 / DME-TEG and of LiBr / CH₃OH. A solution of freon-22 / DME-TEG evaporator provides a boiling point of from –15 to –23°C, and in machines with LiBr / CH₃OH solution – boiling temperature of the evaporator from –6 to –12°C. Factor conversion of heat into refrigeration with refrigerant freon-22 was $\eta_{ht} = q_0 / q_h = 0,688–0,72$, and machines with refrigerant methanol $\eta_{ht} = 0,82–0,85$.

Key words: absorption refrigeration machines, secondary sources of heat, process solution – lithium bromide / methanol, freon / organic absorbent, conversion factor oh heat.

Введение. Широкое строительство торговых-развлекательных центров, отелей, охлаждаемых помещений для хранения овощей и фруктов и других подобных зданий требует их оснащения системами охлаждения и кондиционирования воздуха. Величина требуемой холодопроизводительности для кондиционирования крупных объектов площадью 33 000–100 000 м² составляет 4000–8000 кВт. В охлаждаемых помещениях для хранения продуктов, овощей, фруктов требуется температура от –2 до –14°C, а температура кипения холодильного агента в испарителе холодильной машины должна быть порядка –6...–18°C. Использование на подобных объектах парокомпрессионных холодильных машин вызывает ряд проблем, связанных с вопросами

тепло- и электроснабжения. Проблема тепло-снабжения в странах с теплым климатом, например в Израиле, в большинстве стран Европы решается путем установки парокомпрессионных тепловых насосов. В России, Беларуси, Прибалтийских и других странах для отопления применяют автономные котельные, которые в теплый период, как правило, отключены. Но отопление и охлаждение с применением компрессионных холодильных машин требуют значительного расхода электроэнергии. Например, для холодильной машины холодопроизводительностью $Q_0 = 330$ кВт и при холодильном коэффициенте $\varepsilon = 3,0$ требуемая электрическая мощность составляет

$$N = Q_0 / \varepsilon = 330 / 3,0 = 110 \text{ кВт.}$$

Крупный торговый центр или склад хранения продуктов требует установки компрессорных машин со значительно большей энергоемкостью, которая достигает 3000–4500 кВт. Существенный рост стоимости электрической энергии в последние десять лет вызвал повышенный интерес к абсорбционным холодильным машинам, которые позволили бы получать требуемые температуры охлаждения. Абсорбционные машины потребляют электрической энергии в 4–5 раз меньше, чем компрессионная холодильная машина даже с учетом расхода энергии на привод циркуляционного насоса и насосов подачи охлаждающей воды на конденсатор и абсорбер.

Абсорбционные холодильные машины (АХМ) относятся к группе теплоиспользующих машин. Рабочим веществом АХМ является раствор, состоящий из двух компонентов с различными температурами кипения при одинаковом давлении. Один компонент с более низкой температурой кипения является холодильным агентом, а другой – абсорбентом (поглотителем). Известно много пар компонентов, которые могут быть использованы в качестве рабочих веществ АХМ. Однако на практике в основном используют водоаммиачный раствор, где холодильным агентом является аммиак, и водный раствор бромистого лития, в котором холодильным агентом служит вода. Абсорбционные водоаммиачные холодильные машины применяют для получения отрицательных температур (от -5 до -70°C), бромистолитиевые – для получения положительных температур (охлаждение воды до $+8...+15^{\circ}\text{C}$) [1, 2, 3].

Абсорбционная машина может служить не только для охлаждения, но и для нагревания. Затрачивая теплоту высокого потенциала, получают большее количество теплоты низкого потенциала (понижающий трансформатор). При наличии охлаждающей среды с низкой температурой (например, воды температурой $+5...+10^{\circ}\text{C}$) можно повысить температуру греющего источника, получив меньшее количество теплоты более высокого потенциала (повышающий трансформатор).

Абсорбционные холодильные машины широко используют в промышленности для выработки технологического холода, для систем кондиционирования воздуха. Во всех случаях выработка искусственного холода осуществляется за счет отводимой вторичной теплоты технологических процессов, теплоты тепловых электростанций в неотапительный период, солнечной энергии. Нередко имеется экономическая целесообразность использовать абсорбционные машины на огневом обогреве [4, 5]. Наличие на объекте автономной котельной (газовой или работающей на любом топливе) для

холодоснабжения с применением абсорбционных холодильных машин не имеет альтернативы.

В настоящее время на рынок поступают абсорбционные холодильные машины, которые работают хорошо известными рабочими веществами: вода / аммиак и бромид лития / вода.

Водоаммиачные холодильные машины производительностью от 100 до 10 000 кВт, как одноступенчатые, так и двухступенчатые, охватывают весь диапазон отрицательных температур кипения. Такие холодильные машины изготавливают старейшие компании Германии Borsig AG и Linde AG. Компания AGO Kulmbach (Германия), которая работает с 1980 г., выпускает водоаммиачные холодильные машины производительностью 50–100 кВт. Многие фирмы, например SolarNext AG, Pink Langenwang (Австрия), изготавливают абсорбционные холодильные машины производительностью 12–15 кВт.

Водоаммиачная холодильная машина, которая обеспечивает получение умеренно низких температур кипения в испарителе, имеет ряд существенных недостатков. Такая холодильная машина на единицу вырабатываемого холода тяжелее в несколько раз, чем аналогичная компрессионная машина. Для нагрева рабочего раствора требуется температура греющего источника порядка $120\text{--}130^{\circ}\text{C}$, что не всегда можно обеспечить вторичными ресурсами в процессе производства. Наличие дефлегматора и довольно сложная конструкция генератора (кипятильника), повышенные требования к технике безопасности делают водоаммиачные холодильные машины малоконкурентными на рынке абсорбционных машин.

Бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) имеют ряд преимуществ перед другими типами машин: более качественные технико-экономические показатели, низкий уровень шума, компактность, взрыво- и пожаробезопасность. Этими преимуществами объясняется тот факт, что изготовлением АБХМ занимаются фирмы США (Carrier, Trane и др.), Японии (Ebara, Kawasaki, Sanyo, Yazaki и др.), Европы (EAW Energieanlagenbau GmbH, SOLution, Rottartica и др.). В России бромистолитиевые холодильные машины и абсорбционные тепловые насосы изготавливает новосибирский завод «ОКБ ТеплоСибМаш». Первые АБХМ изготавливались по лицензии фирмы Carrier. В настоящее время выпуск холодильных машин производят по разработкам «ОКБ ТеплоСибМаш» [6, 7, 8]. Производительность по холоду выпускаемых машин от 350 до 4000 кВт. Тепловая производительность выпускаемых тепловых насосов 600–10 000 кВт.

Бромистолитиевые АБХМ – это, как правило, агрегатированные установки в однокорпус-

ном или двухкорпусном исполнении. Они имеют внушительные размеры и большой вес. Это вызвано тем, что внутри корпуса машины поддерживается достаточно глубокий вакуум, а удельный объем паров воды при заданном вакууме очень большой. Для получения холодной воды температурой 10–15°C требуется вакуум 9,22 и 13,375 мм рт. ст. соответственно. При таком вакууме толщина стенки корпуса аппаратов достигает 25 мм и более, что значительно утяжеляет бромистолитиевую холодильную машину.

Имеется значительное количество производств, где в технологических процессах требуется очень холодная вода (ледяная) с температурой 0,5–1,5°C. В работе [9] предложена бромистолитиевая холодильная машина, которая позволяет получать температуру хладагента в пределах 1,0–1,5°C. В работах [7, 10, 11] такие машины получили название низкотемпературных бромистолитиевых холодильных машин. В принципе, это двухступенчатые абсорбционные машины, которые имеют обязательно два испарителя и два абсорбера [12, 13]. Практическое воплощение подобных холодильных машин показано в работах [10, 11]. Для получения температуры кипения в низкотемпературном испарителе порядка –8...–10°C в качестве хладагента использовали водный раствор бромистого лития с концентрацией не ниже 15% [10]. Концентрация раствора в низкотемпературном испарителе управляется (поддерживается) с помощью специального жидкостного контроллера [13]. Контроллер осуществляет регулирование скорости потока жидкого хладагента, поступающего из первого испарителя. Конструктивная схема таких холодильных машин сложная, требует дополнительных циркуляционных насосов для хладагента. От пользователей нет данных, насколько устойчиво работают такие машины и как обеспечиваются в них заданные температурные параметры. Пока перечень по использованию низкотемпературных бромистолитиевых машин не очень большой.

Проведенный анализ существующих абсорбционных машин для получения низких температур (температура кипения в испарителе –10...–18°C) показывает, что на рынке присутствуют в основном водоаммиачные холодильные машины. Чтобы заполнить этот интервал температур, разработчики и изготовители абсорбционных машин вновь обратились к рабочим веществам, которые относятся к хладоновым и спиртовым системам [6, 14, 15].

В течение длительного времени для получения холода главным объектом исследования были системы фреон-22 / органический абсорбент. В качестве абсорбентов использовали дибутилфталат и диметиловый эфир тетраэтилен-

гликоля (ДМЭ-ТЭГ) [DME-TEG (tetraethylene glycol dimethyl ether)].

Опытная абсорбционная холодильная машина, которая работала на растворе фреон-22 / дибутилфталат [16], показала устойчивую работу при различных температурных режимах и постоянную температуру кипения в испарителе. Тепловой коэффициент составил 0,625 при температуре фреона на входе в испаритель –4°C и 0,618 при температуре фреона +7°C. На основании испытаний опытного образца была подтверждена практическая возможность использования раствора фреона-22 и дибутилфталата в качестве рабочего раствора для абсорбционной холодильной машины.

Первая АХМ промышленного типа с пластинчатыми теплообменными аппаратами была испытана во ВНИХИ [17]. В данной машине также использовали раствор фреона-22 с дибутилфталатом. Проведенные исследования показали устойчивую работу машины в интервале кипения холодильного агента в испарителе от –10 до +4°C. При этом холодопроизводительность (брутто) составила 29,12 кВт при –10°C, и 37,0 кВт при температуре кипения +4°C. Опыты подтвердили возможность использования пластинчатых аппаратов в АХМ. Тепловой коэффициент преобразования (нетто) при температуре кипения –10°C не превысил величины 0,4, что значительно ниже, чем у машин на солевых растворах.

Известна абсорбционная холодильная машина, которая работала на растворе фреон-22 / диметиловый эфир тетраэтиленгликоля (DME-TEG) [18]. Машина прошла стендовые испытания и показала достаточно устойчивую работу. Доказана зависимость зоны устойчивой работы машины от температуры раствора в генераторе и от кратности циркуляции раствора.

На основании приведенных данных и других многочисленных исследований [2, 5, 6, 15, 18, 19] наиболее перспективным абсорбентом в смеси с фреон-22 был признан абсорбент ДМЭ-ТЭГ.

В конце 90-х годов было предложено для фреона-22 использовать в качестве абсорбента N-метил-2-пирролидон (N-methyl-2-pyrrolidone) [20]. Это сильнодействующий растворитель, который очень агрессивен ко всем прокладочным материалам за исключением фторопласта. В связи с этим его использование для АБХМ с хладоном-22 проблематично и совершенно неясна продолжительность его работы в условиях абсорбционной машины.

В результате ограничений на холодильные агенты, считающиеся «разрушителями озонового слоя», фреон-22 попал под запрет для дальнейшего использования в холодильных машинах. Это дало повод и толчок для разра-

ботки новых холодильных агентов на основе фторуглеродистых соединений без ввода в данные соединения молекул хлора. Естественно, для новых фреонов потребовались поиски и новые разработки абсорбентов для АХМ. В патенте США 4,428,854 [21] предложено рабочее вещество для АХМ на основе R134 / ДМЭ-ТЭГ. В публикации [22] приведен подробный анализ работы АХМ с рабочим раствором R134a / DMAC (N, N-dimethylacetamide, диметилацетамид). Указанная холодильная машина оснащена генератором, который совмещен с ректификационной колонкой. Кроме того, в схему холодильной машины включен теплообменник пар – жидкость, в котором жидкий холодильный агент, поступающий в испаритель, переохлаждают парами, которые должны поступать в абсорбер.

Холодильные агенты R134 и R134a относятся к группе озонобезопасных фреонов [5, 23]. Это является положительным качеством предложенного рабочего вещества. Но использование этих фреонов с ранее известными абсорбентами выявило значительные недостатки в работе холодильной машины. В абсорбционных машинах с указанными растворами невозможно использовать вторичные источники теплоты с умеренными (до 100°C) температурами. Для работы таких абсорбционных машин требуется высокая температура греющего источника, которая в среднем составляет 140–150°C.

Повышенная температура в генераторе холодильной машины приводит к интенсивному разложению абсорбента. Продукты разложения накапливаются в испарителе и приводят к снижению коэффициента теплопередачи и неустойчивой работе машины уже при температуре кипения холодильного агента порядка –5...–10°C.

Наиболее широко представлена разработка новых рабочих веществ для АХМ в патентных исследованиях [24–27]. Данные работы в основном выполнены работниками научно-исследовательского института компании Du Pont Chemicals & Fluoroproducts (США). Наряду с представленными различными рабочими смесями для АХМ предложены циклы гибридных холодильных машин. Отличительной особенностью гибридной машины является наличие механического компрессора. Как показано в издании [24], существует две схемы подключения компрессора, одна из которых должна обеспечить отвод части паров из испарителя, другая – отсос паров холодильного агента из испарителя и генератора. Практическое воплощение гибридных циклов представляется сомнительным. Непонятно, каким образом регулировать потоки паров холодильного агента, отводимого из испарителя. Тем более совсем непонятно, что будет происходить при одно-

временном отсосе паров из испарителя и генератора. При использовании существующих рабочих смесей фреонов и органических абсорбентов применение подобных гибридных циклов вряд ли возможно.

Проверка возможности использования рабочих растворов на основе фреонов была проведена на базе компании AB-AD Cooling Systems (Израиль) специалистами Scientific-Engineering Center (г. Маалот, Израиль). Для этих целей было разработано несколько конструкций абсорбционных машин. На рис. 1 приведена принципиальная схема абсорбционной холодильной машины № 1 (нумерация компании) холодопроизводительностью 32–35 кВт. Расчетная температура кипения в испарителе –16...–18°C, температура конденсации +35°C. На рис. 2 представлена фотография рабочего варианта экспериментальной холодильной машины, которая предназначена для работы с хладоновыми рабочими растворами.

Машина выполнена по классической схеме абсорбционных холодильных машин.

В генераторе 1 над пучком теплообменных трубок установлено распределительное устройство 7. Аналогичное распределительное устройство 8 установлено в абсорбере 5. Между генератором 1 и конденсатором 2 на трубопроводе подачи паров фреона в конденсатор установлен каплеотделитель 9, который может работать как ректификатор. Размеры и конструкция каплеотделителя подбирались опытным путем. Как показали опыты, чтобы протекал процесс ректификации, каплеотделитель должен иметь тангенциальный ввод паров из генератора 1 и наличие рубашки с воздушным охлаждением.

Конструктивное исполнение машины № 1: все аппараты кожухотрубного типа, абсорбер и генератор с плавающей трубной доской, испаритель и конденсатор с прямыми трубками. Трубки медные с накатным оребрением. Наружный диаметр трубок 16 мм. Расположение аппаратов – горизонтальное.

Разработаны рабочие чертежи абсорбционной холодильной машины, в которой установлен конденсатор с воздушным охлаждением. На рис. 3 показан общий вид холодильной машины № 2. В этой машине использован абсорбер и генератор кожухотрубного типа с плавающей трубной доской. Испаритель также кожухотрубного типа, но с жесткими трубными досками. Холодильная машина предназначена для работы с рабочим раствором фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ. Расчетная производительность холодильной машины 15 кВт при температуре кипения в испарителе –15°C. Температура конденсации +40°C. Изготовление машины планируется до конца 2017 г.

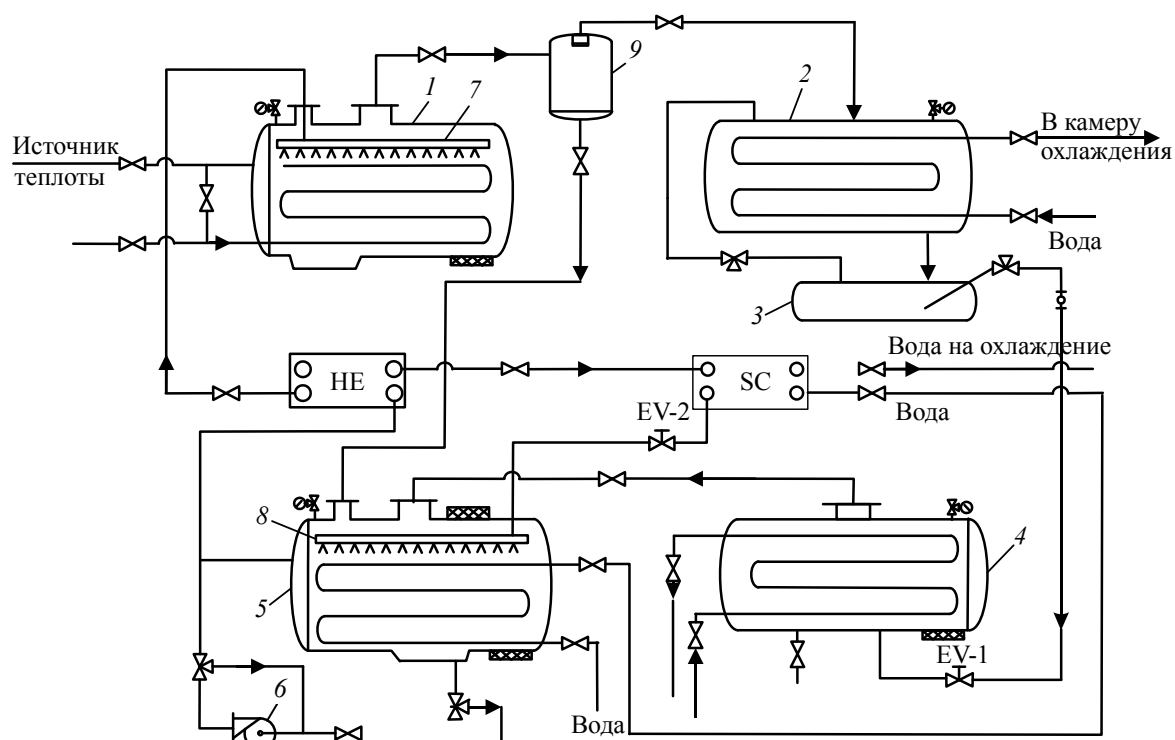


Рис. 1. Принципиальная схема абсорбционной холодильной машины для работы с хладоновыми растворами:

1 – генератор; 2 – конденсатор; 3 – ресивер; 4 – испаритель; 5 – абсорбер;
6 – циркуляционный насос; 7, 8 – распределительное устройство; 9 – каплеотделитель;
HE – регенеративный теплообменник раствора,
SC – водяной переохладитель раствора, EV-1, EV-2 – регулирующий вентиль

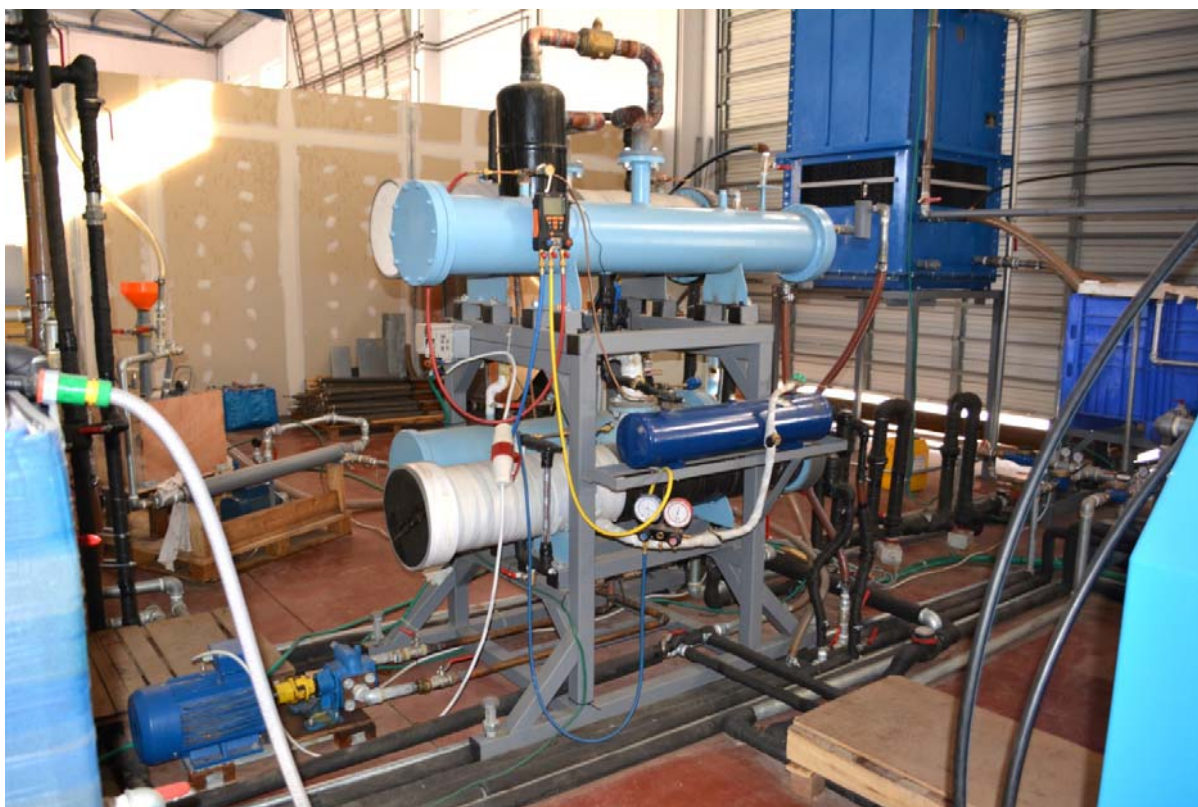


Рис. 2. Пилотная модель машины № 1 для работы с хладоновыми рабочими веществами

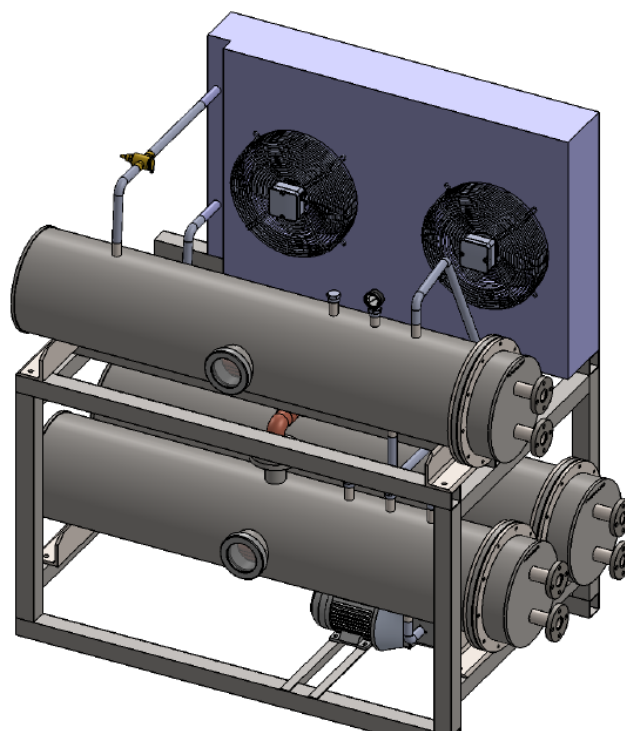


Рис. 3. Пилотная модель АХМ с конденсатором воздушного охлаждения

Рабочая модель холодильной машины № 1 изготовлена и испытана. Испытания проводили с рабочими растворами: фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ, фреон-22 / N-метил-2-пирролидон, фреон-22 / дибутилфталат и фреон-134a / ДМЭ-ТЭГ. В процессе испытаний установлены предельные и оптимальные температуры кипения в испарителе, минимальная температура греющего источника, стойкость и эффективность абсорбентов. Определены величины коэффициентов преобразования теплоты в зависимости от температуры конденсации и температуры греющего источника.

Испытания показали, что рабочий раствор фреон-22 / N-метил-2-пирролидон непригоден для использования в АХМ. Агрессивность его практически ко всем прокладочным материалам вынуждает переделывать все уплотнения аппаратов и циркуляционного насоса. Температура греющего источника для работы машины составляет 96–99°C. При работе с раствором NMP наблюдается интенсивный унос абсорбента из генератора с парами фреона. В результате происходит быстрое загрязнение поверхности теплообмена испарителя. При этом снижается коэффициент теплопередачи в испарителе и конденсаторе.

При испытаниях с рабочими веществами фреон-22 / дибутилфталат и фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ были получены устойчивые температуры кипения в испарителе в пределах –15... –22°C. Так как температура кипения зависит от температуры конденсации, температуры греющего

источника и охлаждающей воды, подаваемой в абсорбер, то при заданных расчетных параметрах оптимальная температура кипения в испарителе составляет –16...–18°C. При этом минимальная температура греющего источника равна 83°C, оптимальная температура 90–92°C. Соответственно, давление в генераторе поддерживалось в пределах 9–10 бар. Стабильная работа холодильной машины составила 60–70 ч.

Наиболее устойчивые результаты получены при температуре охлаждающей воды, подаваемой в конденсатор и абсорбер, 23–25°C. Кратность циркуляции раствора составляла 3,4–4,6. Регулировку величины кратности циркуляции производили изменением частоты вращения рабочего колеса циркуляционного насоса.

В испарителе охлаждали 30%-ный водный раствор этиленгликоля, который использовали для получения водного льда. Минимальная температура холодного этиленгликоля на выходе из испарителя –12°C.

Тепловые нагрузки генератора, абсорбера и конденсатора соответствовали расчетным значениям. Тепловая нагрузка испарителя в первых экспериментах соответствовала расчетным значениям. В дальнейшем происходило снижение тепловой нагрузки и резкое снижение коэффициента теплопередачи. При использовании рабочих веществ фреон-22 / дибутилфталат и фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ наблюдался не только унос абсорбента, но и его частичное разложение с образованием спиртовых углеводородных групп и осадка в виде хлопьев. Унос из генера-

тора абсорбента с парами холодильного агента вынуждал проводить продувку испарителя от осадка, что приводило к потерям фреона.

Все абсорбенты органического происхождения имеют сложную структуру. Естественно, при повышенных рабочих температурах и давлениях в генераторе проявляется термическая нестойкость абсорбентов и самих фреонов, например фреона-21. Поэтому АХМ, в которых предполагают использовать хладоновые рабочие вещества, необходимо оснащать дефлегматором и ректификационной колонкой. Работа холодильной машины была значительно улучшена, когда между генератором и абсорбером после регенеративного теплообменника раствора установили водяной переохладитель.

От испытаний с рабочим раствором фреон-134a / ДМЭ-ТЭГ пришлось отказаться, так как для нормальной работы абсорбционной машины с таким раствором необходима температура греющего источника порядка 140°C. Это очень высокая температура для греющего источника, для ее достижения требовалось установить специальный бойлер для получения пара или горячей воды. В нашей установке подготовка греющего источника (вода и этиленгликоль) для подачи в генератор производилась от сол-

нечной энергии до температуры 60–65°C, а затем температуру поднимали до 87–95°C с помощью электрического нагревателя.

Рабочий раствор фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ был использован в верхней ветви холодильной машины комбинированного типа. Эти машины состоят из абсорбционной холодильной машины (верхний каскад или ступень высокого давления) и компрессионной холодильной машины (нижний каскад или ступень низкого давления). Принципиальное отличие холодильной машины комбинированного типа от гибридной машины в том, что в первой используется два разных холодильных агента, а во второй – только один.

Рабочая модель холодильной машины комбинированного типа приведена на фотографии (рис. 4). Верхняя ступень каскада (UC) – абсорбционная холодильная машина, нижняя ступень (LC) – компрессионная холодильная машина, работающая на фреоне-410А. В машине использован спиральный компрессор фирмы Copeland с электродвигателем мощностью 3,745 кВт. Морозильная камера оснащена испарителем сухого типа, холодопроизводительностью 5,5–7,0 кВт. Производительность верхней ступени (каскада) порядка 7,0–9,5 кВт.

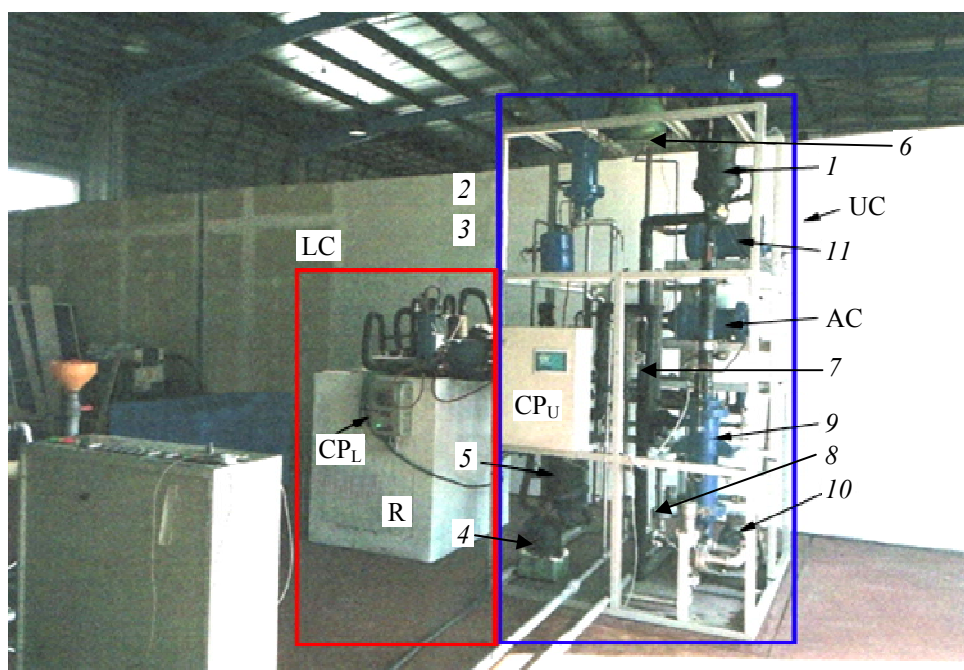


Рис. 4. Холодильная машина комбинированного типа:

UC – верхняя ступень (каскад); LC – нижняя ступень (каскад);

CP_U – щит управления машиной верхней ступени (каскада);

CP_L – щит управления машиной нижнего каскада; R – морозильная камера;

AC – водяной переохладитель раствора;

1 – генератор; 2 – конденсатор; 3 – ресивер верхнего каскада (UC);

4 – ресивер нижнего каскада (LC); 5 – испаритель-конденсатор (UC / LC);

6 – каплеотделитель; 7 – расходомер горячей воды; 8 – расходомер холодной воды;

9 – абсорбер; 10 – циркуляционный насос; 11 – теплообменник раствора

Верхняя и нижняя ступень (каскада) объединены между собой испарителем-конденсатором 5, который имеет испарительный и конденсаторный контуры. Испарительный контур является испарителем холодильного агента верхней ступени (каскада), конденсаторный контур – конденсатором холодильного агента нижней ступени (каскада). Абсорбер, генератор, конденсатор и испаритель-конденсатор абсорбционной холодильной машины – вертикальные аппараты кожухотрубного типа. Теплообменные трубки медные, с внешним и внутренним оребрением. Внутренний диаметр трубок 16 мм, толщина стенки 1,5 мм. Расчетная температура кипения в контуре испарения –15°C. Температура конденсации в контуре конденсации фреона-410а –10°C. Холодильный агент верхней ступени (каскада) поступает из конденсатора абсорбционной холодильной машины через ресивер верхнего каскада в межтрубное пространство испарителя-конденсатора (контур испарения). Холодильный агент нижней ступени (каскада) компрессором подается в трубки испарителя-конденсатора (контур конденсации). Жидкий холодильный агент нижнего каскада сливается в ресивер, а оттуда поступает в регенеративный теплообменник типа жидкость – пар. В указанном теплообменнике жидкость переохлаждается паром холодильного агента, который отводит из испарителя морозильной камеры.

Система циркуляции рабочего раствора абсорбционной машины оснащена герметичным шестеренчатым насосом. Насос снабжен регулируемым электроприводом. Для опытного экземпляра машины принята завышенная мощность электродвигателя насоса – 1,5 кВт.

Проведенные установочные испытания холодильной машины комбинированного типа дали возможность определить интервал температур кипения в контуре испарения испарителя-конденсатора. Температуру кипения в испарителе-конденсаторе изменяли от –1 до –13°C.

При температуре кипения –1°C в испарительном контуре морозильной камеры достигалась температура –42,2°C. При температуре кипения –5°C эта цифра составляла –46,5°C. При этом давление нагнетания компрессора нижнего каскада не превышало 5,7 бар, а температура перегрева на выходе из компрессора была не более 60°C.

Испытания АХМ с рабочим раствором фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ показали возможность получения температур кипения в испарителе в пределах –15...–23°C, при этом коэффициент преобразования теплоты составляет $\eta_{ht} = q_0 / q_h = 0,688–0,720$ где q_0 и q_h – соответственно тепловой поток в испарителе и генераторе, кДж/кг.

Полученные результаты испытаний АХМ подтвердили возможность и целесообразность использования такой машины в качестве верхней ступени двухступенчатых холодильных машин.

Основное преимущество холодильных машин комбинированного типа – их более высокая эффективность по сравнению с традиционными аналогами: они на 40–42% меньше потребляют электроэнергии, у них в 2 раза выше холодильный коэффициент. В таблице приведены сравнительные характеристики двухступенчатой холодильной машины и машины комбинированного типа. За основу сравнения были взяты одинаковая холодопроизводительность и получаемая температура кипения в испарителе. Для машины комбинированного типа (в абсорбционной ступени) учитывалась мощность всех электродвигателей установленных насосов: циркуляционного, насосов подачи воды в конденсатор, градирни и абсорбера.

Указанные машины могут изготавливаться в широком диапазоне мощностей в соответствии с возможными требованиями различных пользователей. При серийном производстве машины комбинированного типа имеют такую же цену, как и двухступенчатые холодильные машины, которые присутствуют на рынке.

Сравнение холодильной машины комбинированного типа и двухступенчатой холодильной машины

Тип машины	Ступень сжатия	Q_0 , кВт	t_0 , °C	N_{ec} , кВт	N_{ic} , кВт	N_{ip} , кВт	Холодильный агент	ϵ
Двухступенчатая холодильная машина	Hp-S	93,0	–40,83	22,3	23,5	52,0	NH ₃	3,01
	Lp-S			26,3	28,5		NH ₃	
Холодильная машина комбинированного типа	U-B	93,0	–49,68	4,0	4,5	30,0	R22	5,76
	L-B			23,3	25,5		R410a	

Примечание. Условные обозначения: Hp-S – верхняя ступень сжатия; Lp-S – нижняя ступень сжатия; U-B – верхняя ветвь каскада (ступень сжатия); L-B – нижняя ветвь каскада (ступень сжатия); Q_0 – холодопроизводительность; t_0 – температура кипения в испарителе; N_{ec} – эффективная мощность; N_{ic} – установленная мощность; N_{ip} – суммарная мощность; ϵ – холодильный коэффициент.

Возможность использования метилового (CH_3OH) и этилового ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) спиртов в качестве холодильного агента для АХМ рассматривается в работах [1, 2, 4, 6, 7]. По теплофизическим свойствам предпочтительнее системы на основе метанола: $\text{CH}_3\text{OH} / \text{LiBr}$, $\text{CH}_3\text{OH} / \text{LiCl}$, $\text{CH}_3\text{OH} / \text{ZnBr}_2$. Основное достоинство метилового спирта в качестве холодильного агента – это возможность получения отрицательных температур в испарителе (до -18°C) и большое абсолютное значение теплоты парообразования. Для АХМ положительными качествами метанола являются полное отсутствие в паровой фазе абсорбента, низкие давления в аппаратах и небольшая разница давлений в абсорбере и генераторе. Отмеченные в работах [1, 2, 6] недостатки, такие как повышенная вязкость раствора и возможность кристаллизации солей при пониженных температурах, достаточно просто решаются правильным выбором рабочих параметров и конструктивными добавлениями в абсорбере и испарителе.

Результаты исследования абсорбционной холодильной машины с использованием раствора $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$ приведены в работе [28]. Исследования проводились на лабораторной установке, собранной по обычной схеме абсорбционной машины из отдельных аппаратов. Все теплообменные аппараты (абсорбер, генератор, испаритель, конденсатор) – установки кожухотрубного типа. Теплообменник раствора имеет тип труба в трубе. В установке использованы некоторые конструктивные элементы для предотвращения поступления воздуха в систему и подключены вакуумные насосы к абсорберу и конденсатору.

Установка работала при концентрациях раствора в абсорбере 47–53%, в генераторе – 53–57%. Минимальная упругость паров, которая была достигнута в испарителе, составляла 7 мм рт. ст. (температура насыщения $-19,8^\circ\text{C}$). Приведенные результаты исследований подтвердили возможность получения температур в испарителе до -15°C при температуре охлаждающей воды 25°C и греющего источника 120 – 130°C . Полученные опытным путем значения теплового коэффициента преобразования были в пределах $\eta_{ht} = 0,44$ – $0,48$.

Абсорбционный холодильник лабораторного типа, который прошел испытания с рабочим раствором $\text{CH}_3\text{OH} / 2\text{LiBr} / \text{ZnBr}_2$, показан в работе [29]. В основу разработки положена возможность использования солнечной энергии для работы абсорбционной холодильной машины. Как видно из представленных материалов, использование в холодильнике солнечных коллекторов обеспечивает температу-

ру нагрева в генераторе порядка 50 – 60°C . Минимально достигнутая температура в испарителе $+7^\circ\text{C}$. Тепловой коэффициент преобразования $\eta_{ht} = 0,58$. Поверхность солнечных коллекторов составляет 2 м^2 , что может соответствовать порядка $1,8$ – 2 кВт (для географических условий проведенных опытов).

Таким образом, производительность холодильника не превышала $1,5 \text{ кВт}$. С точки зрения конструктивного исполнения указанный абсорбционный холодильник не оформлен для промышленного изготовления. Кроме того, данный холодильник не может обеспечить получение отрицательных температур в испарителе.

Абсорбционная холодильная машина с рабочим раствором бромистый литий / метанол ($\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$) была разработана, изготовлена и испытана специалистами Scientific-Engineering Center (г. Маалот, Израиль) на базе компании AB-AD Cooling Systems (Израиль). На рис. 5 приведена принципиальная схема холодильной машины, а на рис. 6 представлена фотография рабочей модели машины.

Расчетная холодопроизводительность машины 30 кВт (при температуре кипения в испарителе $+6^\circ\text{C}$) и 18 кВт при температуре кипения в испарителе -10°C . Расчетная температура конденсации $+35^\circ\text{C}$.

Чтобы устранить возможную кристаллизацию раствора при его переохлаждении, в поддоне абсорбера имеются устройства для установки нагревательных элементов. Для слива метанола из испарителя в процессе технологической или иной остановки холодильной машины, испаритель и абсорбер соединены сливным трубопроводом, на котором установлен автоматический электромагнитный клапан (SCV) и насос 13, включающийся при остановке холодильной машины. Слив жидкого метанола из испарителя в абсорбер в свою очередь предотвращает кристаллизацию раствора.

Подачу слабого раствора на теплообменные трубки генератора осуществляют циркуляционным насосом 10 через распределительное устройство 14. Распределительное устройство 14 выполнено в виде веерного распределителя с сетчатыми оросителями. Распределительное устройство абсорбера 15 также выполнено в виде веерного распределителя с оросителями, которые имеют сливные отверстия переменного диаметра. Для равномерного распределения потока раствора на теплообменные трубки абсорбера под распылительным устройством 15 и над теплообменными трубками установлена сетчатая перегородка 16.

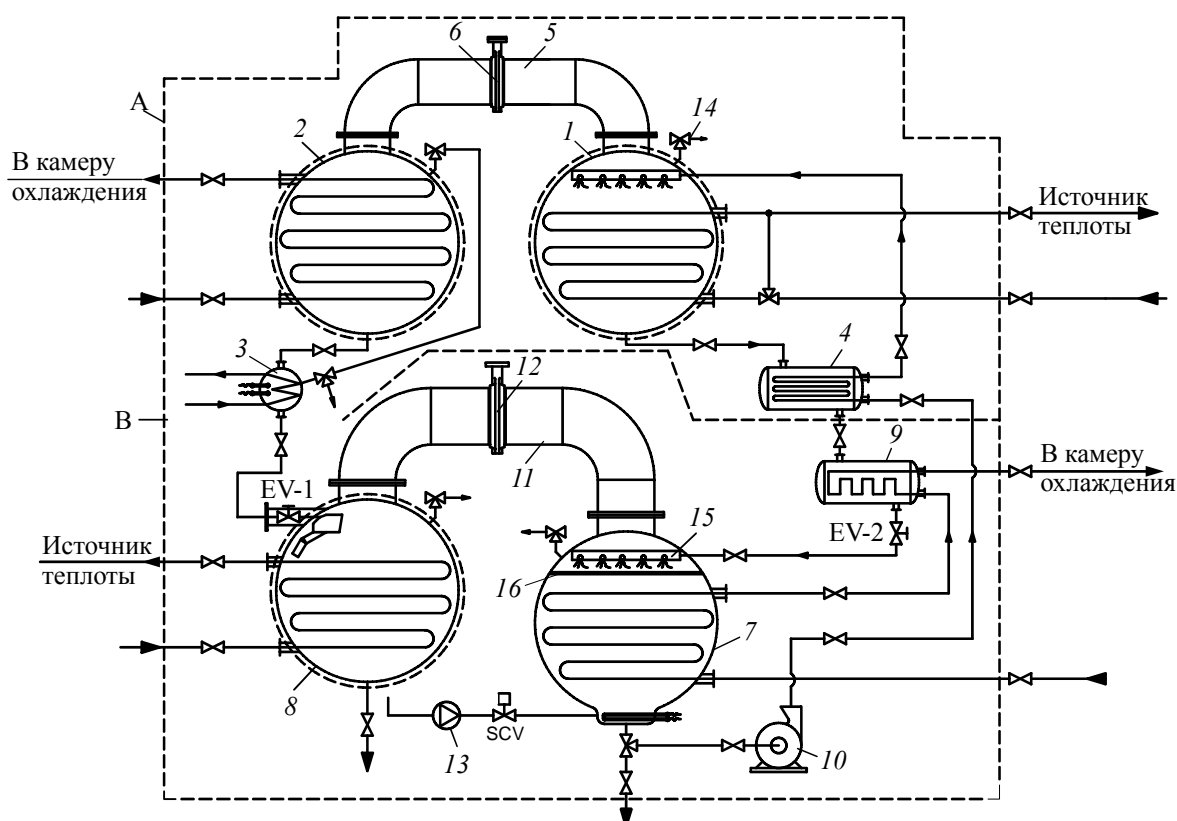


Рис. 5. Принципиальная схема абсорбционной холодильной машины с рабочим раствором $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$:
 А, В – сборочные блоки; 1 – инвертор; 2 – конденсатор; 3 – ресивер; 4 – регенеративный теплообменник;
 5 – отвод; 6 – самодействующий обратный клапан; 7 – абсорбер; 8 – испаритель;
 9 – переохладитель раствора; 10 – циркуляционный насос; 11 – отвод;
 12 – самодействующий обратный клапан; 13 – насос; 14 – распределительное устройство;
 15 – распределительное устройство абсорбера; 16 – сетчатая перегородка;
 SCV – автоматический электромагнитный клапан; EV-1, EV-2 – регулирующий вентиль



Рис. 6. Пилотный вариант АБХМ с рабочим раствором $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$

При конструировании холодильной машины для работы на растворе $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$ учитывали теплофизические свойства паров метанола. Снижение температуры кипения от 0 до -15°C приводит к увеличению удельного объема пара на 6–10% при понижении температуры на каждый 1°C . При отрицательных температурах кипения метанола в испарителе порядка $-15\ldots-12^\circ\text{C}$, удельный объем паров составляет $28\text{--}40 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Большие удельные объемы паров требуют значительного увеличения проходных сечений соединительных паровых трубопроводов между генератором и конденсатором, особенно между испарителем и абсорбером. Для увеличения проходных сечений пара абсорбер и конденсатор имеют по два патрубка с внутренним диаметром 150 мм каждый. Генератор и конденсатор также снабжены двумя патрубками каждый, но их внутренний диаметр равен 50 мм. Все аппараты холодильной машины кожухотрубного типа снабжены гладкими U-образными медными трубками. Наружный диаметр теплообменных трубок во всех аппаратах 19 мм.

Так как АХМ с рабочим раствором $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$ предназначена для получения отрицательных температур, план испытаний машины разбит на несколько этапов. Первый этап включает определение правильности выбора конструктивного исполнения холодильной машины, условий работы системы при заданном вакууме в аппаратах и температурах греющей и охлаждающей воды. Вторым этапом предусматривается определение наиболее точной исходной концентрации и кратности циркуляции раствора между абсорбером и генератором. На третьем этапе необходимо выполнить весь комплекс испытаний, в том числе ресурсные испытания, для создания стандартного ряда абсорбционных машин с рабочим раствором $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$.

К настоящему моменту первый этап работы закончен и приступили ко второму. Испытания первого этапа показали, что температура кипения в испарителе в значительной степени зависит от температуры охлаждающей воды, подаваемой в абсорбер. При температуре воды, подаваемой в абсорбер $+30\ldots+35^\circ\text{C}$, температура кипения в испарителе составила $+5\ldots+6^\circ\text{C}$. Выявлена также зависимость температуры кипения от концентрации раствора, который поступает из генератора в абсорбер. Проведенные испытания не подтвердили положительного влияния одинаковой концентрации раствора [20], подаваемого в абсорбер и генератор. Кроме того, более низкая концентрация слабого раствора в генераторе позволяет работать с температурой греющего источника $64\text{--}68^\circ\text{C}$.

Предварительные эксперименты показали, что при определенных величинах кратности циркуляции раствора и понижении температуры охлаждающей воды в абсорбере до 20°C в испарителе получали температуру кипения порядка $-5\ldots-6^\circ\text{C}$. Для поддержания в испарителе заданных отрицательных температур кипения, например $-10\ldots-12^\circ\text{C}$, в конструкцию холодильной машины внесены некоторые изменения. Определены коэффициенты преобразования тепловой энергии, которые составили $\eta_{ht} = 0,804\text{--}0,810$. Можно предположить, что при замене теплообменных гладких трубок на оребренные позволит получить коэффициент преобразования порядка $\eta_{ht} = 0,82\text{--}0,85$.

Абсорбционные холодильные машины с рабочим раствором $\text{LiBr} / \text{CH}_3\text{OH}$ могут успешно конкурировать с бромистолитиевыми машинами. Основное преимущество использования таких машин заключается в том, что значительно расширяется температурный диапазон работы. Абсорбционные машины, в которых холодильным агентом является метанол, могут вырабатывать холод – как для систем кондиционирования воздуха, так и для выработки технологического холода с температурой до -15°C .

Более широкий температурный диапазон работы машин на спиртовых смесях увеличивает рынок спроса на них для промышленных и бытовых целей. Для спиртовых систем требуется более низкая температура греющего источника, что делает их экономически выгодными по сравнению с бромистолитиевыми машинами.

Холодильные машины со спиртовыми системами изготавливают из отдельных аппаратов, вакуум в аппаратах незначительный (максимальный, порядка 0,04 бара, только в испарителе, что соответствует температуре кипения -10°C). Естественно, при одинаковой производительности холодильных машин, машина на метаноле до полутора раз легче, чем бромистолитиевая машина.

Выводы

1. Разработаны промышленные образцы и проведены тестовые испытания низкотемпературных абсорбционных холодильных машин, в которых использована блочная компоновка основных аппаратов холодильной машины.

2. Блочная компоновка абсорбер – испаритель и генератор – конденсатор снижает общий вес, упрощает монтаж и регулировку холодильной машины.

3. В абсорбционных холодильных машинах, работающих на основе хладонов, наиболее перспективным является раствор фреон-22 / ДМЭ-ТЭГ.

4. Использование абсорбционной холодильной машины в качестве верхней ступени

(каскада) в двухступенчатой машине обеспечивает снижение потребления электрической энергии на 40–42%.

5. Абсорбционные холодильные машины с рабочим раствором LiBr / CH₃OH имеют широкий диапазон температур охлаждения и могут применяться как для систем кондиционирова-

ния воздуха, так и для выработки технологического холода.

6. Коэффициент преобразования тепловой энергии в абсорбционных машинах составил соответственно $\eta_{ht} = 0,68\text{--}0,72$ с рабочим хладоновым раствором и $\eta_{ht} = 0,82\text{--}0,85$ с рабочим раствором LiBr / CH₃OH.

Литература

1. Бадилькес И. С., Данилов Р. Л. Абсорбционные холодильные машины. М.: Пищевая пром-сть, 1966. 178 с.
2. Орехов И. И., Тимофеевский Л. С., Караван С. В. Абсорбционные преобразователи теплоты. Л.: Химия, 1989. 208 с.
3. Галимова Л. В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. 226 с.
4. Бадилькес И. С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин. М.: Гос. изд-во торговой лит., 1962. 287 с.
5. Теплофизические свойства фреонов в 2 т.; под ред. С. Л. Ривкина / Алтунин В. В. [и др.] // М.: Изд-во стандартов, 1980–1985. Т. 1. 1980. 232 с.
6. Абсорбционные преобразователи теплоты / А. В. Бараненко [и др.] // СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. 338 с.
7. Попов А. В. Российские абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы нового поколения // Холодильная техника. 2006. № 6. С. 26–29.
8. Попов А. В. Абсорбционные бромистолитиевые машины для охлаждения и нагрева воды // Энергосбережение. 2007. № 7. С. 52–55.
9. Sakiymota A., Nishiguchi A. Development of an absorption refrigeration machines, operating at heat and cooling temperatures up to below 0°C // Proceedings of the International Conference, Munich, 12–14 November, 1999. Munich, Germany, 1999. P. 35–41.
10. Горшков В. Г., Мухин Д. Г., Дзино А. А. Получение низких температур кипения в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине // Вестник МАХ. 2013. № 4. С. 51–53.
11. Фролкин А. А., Краснов М. И. Применение АБХМ «THERMAX» в пищевой промышленности // Холодильная техника. 2016. № 2. С. 51–54.
12. Absorption refrigeration machine: Patent US 6,122,930 B1. A. Nishiguchi [et al.]. 2000.
13. Absorption refrigerator and the method of producing the same: Patent US 6,247,331 B1. A. Nishiguchi [et al.]. 2001.
14. Мирмов И. Н., Мирмов Н. И. Использование солнечной энергии и вторичных источников теплоты для получения холода // Холодильная техника. 2011. № 9. С. 42–48.
15. Усюкин И. П., Колосков Ю. Д. О применении различных растворов для абсорбционных холодильных установок // Холодильная техника. 1974. № 7. С. 28–31.
16. Селиверстов В. М., Барац В. А., Хвастунов В. Н. Опытная абсорбционная машина, работающая на растворе фреона-22 и дибутилфталата // Холодильная техника. 1967. № 5. С. 17–18.
17. Бадилькес И. С., Рогозянов В. А. Испытание фреоновой абсорбционной машины // Холодильная техника. 1970. № 5. С. 18–20.
18. Усюкин И. П., Чумаченко А. Д., Колосков Ю. Д. Испытание абсорбционной холодильной установки на растворе фреона-22 и диметилового эфира тетраэтиленгликоля // Холодильная техника. 1971. № 5. С. 7–10.
19. Латышев В. П. ξ , i -Диаграммы для растворов фреон-22 – дибутилфталат и фреон-22 – диметилэфир тетраэтиленгликоля // Холодильная техника. 1969. № 7. С. 61–62.
20. Catalog of Company SIGMA. Reference number: M6762.
21. Absorption refrigerant compositions for use in absorption refrigeration systems: Patent US 4,428,854. E. Naonori [et al.]. 1984.
22. Subhadip Roy, Maiya M. P. Analysis of R134a – DMAC vapor absorption system with add-on components // International Journal of Sustainable Built Environment. 2012. Vol. 1, no. 1. P. 26–35.
23. Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Свойства веществ: справочник. Л.: Машиностроение, 1976. 168 с.
24. Hybrid vapor compression-absorption cycle: Patent US 7,765,823. M. Shiflett [et al.]. 2010.
25. Hybrid vapor compression-absorption cycle: Patent US 8,707,720. M. Shiflett [et al.]. 2014.
26. Composition comprising 2,3,3,3-tetrafluoropropene and 1,1,1,2-tetrafluoroethane, chillers containing same and methods of producing cooling therein: Patent US 8,765,004. K. Kontomaris [et al.]. 2014.

27. Pairs of working substances for absorption heat pumps, absorption refrigeration machines and heat transformers: Patent US 9,062,899. A. Boesmann [et al.]. 2015.

28. Гроссман Э. Р., Журавленко В. Я. Исследование абсорбционной холодильной машины с использованием раствора метанола и бромистого лития // Холодильная техника. 1968. № 1. С. 4–6.

29. Onochie E. U., Ajuwa C. I., Ighodalo O. A. Experimental Solar Thermal Refrigerator Using Methanol as Refrigerant // International Journal of Engineering and Technology. 2014. Vol. 4, no. 6. P. 374–386.

References

1. Badylkes I. S., Danilov R. L. *Absorbtsionnye kholodil'nye mashiny* [Absorption refrigeration machines]. Moscow, Pishhevaya promyshlennost' Publ., 1966. 178 p.

2. Orechov I. I., Timofeevsky L. S., Caravan S. V. *Absorbtsionnye preobrazovateli teploty* [The absorption converters of the heat]. Leningrad, Khimya Publ., 1989. 208 p.

3. Galimova L. V. *Absorbtsionnye kholodil'nye mashiny i teplovye nasosy* [Absorption refrigeration machines and heat pumps]. Astrakhan, Izdatel'stvo AGTU Publ., 1997. 226 p.

4. Badylkes I. S. *Rabochiye veshchestva i processy kholodil'nykh mashin* [Working substances and processes of the refrigeration machines]. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo torgovoy literatury Publ., 1962. 287 p.

5. Altunin V. V., Geller V. Z., Petrov V. K. [et al.]. *Teplofizicheskiye svoystva freonov* [Thermal properties of CFCs]. Vol. 1. Edited by S. L. Rivkin. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1980. 232 p.

6. Baranenko A. V., Timofeevsky L. S., Dolotov A. G., Popov A. V. *Absorbtsionnye preobrazovateli teploty* [Absorption converters of the heat]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2005. 338 p.

7. Popov A. V. Russian absorption refrigeration machines and heat pumps of the new generation. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 2006, no. 6, pp. 26–29 (In Russian).

8. Popov A. V. Lithium bromide absorption refrigeration machines for cooling and heating water. *Energosberezheniye* [Energy saving], 2007, no. 7, pp. 52–55 (In Russian).

9. Sakiymota A., Nishiguchi A. Development of an absorption refrigeration machines, operating at heat and cooling temperatures up to below 0°C. *Proceedings of the International Conference*. Munich, Germany, 1999, pp. 35–41.

10. Gorshkov V. G., Mukhin D. G., Jino A. A. Getting low boiling points in the absorption lithium bromide refrigeration machine. *Vestnik MACH* [Herald MAI], 2013, no. 4, pp. 51–53 (In Russian).

11. Frolkin A. A., Krasnov M. I. Application the ABRM “THERMAX” in the food industry. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 2016, no 2, pp. 51–54 (In Russian).

12. Akira Nishiguchi, Ryoko Sakiyama, Tadakatsu Nakajima, Tomihisa Ohuchi. Absorption refrigeration machine. Patent US 6,122,930 B1. 2000.

13. Akira Nishiguchi, Ryoko Sakiyama, Tadakatsu Nakajima, Tomihisa Ohuchi. Absorption refrigerator and the method of producing the same. Patent US 6,247,331 B1. 2001.

14. Mirmov I. N., Mirmov N. I. The use of solar energy and secondary sources of heat to produce cold. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 2011, no. 9, pp. 42–48 (In Russian).

15. Usyukin I. P., Koloskov Yu. D. On the application of the various solutions for the absorption refrigeration units. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 1974, no. 7, pp. 28–31 (In Russian).

16. Seliverstov V. M., Baratz V. A., Khvastunov V. N. Experimental absorption machine is working with solution of Freon-22 and dibutyl phthalate. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 1967, no. 5, pp. 17–18 (In Russian).

17. Badylkes I. S., Rogozyanov V. A. Test of the absorption machine on Freon. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 1970, no. 5, pp. 18–20 (In Russian).

18. Usyukin I. P., Chumachenko A. D., Koloskov Yu. D. Testing of the absorption refrigeration unit with a solution of F22 and tetra ethylene glycol dimethyl ether. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 1971, no. 5, pp. 7–10 (In Russian).

19. Latyshev V. P. ξ, i-Diagrams for solutions of Freon-22 – dibutyl phthalate and Freon-22 – tetra ethylene glycol dimethyl ether. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 1969, no. 7, pp. 61–62 (In Russian).

20. Catalog of Company SIGMA, Reference number: M6762.

21. Enjo Naonori, Aomi Hideki. Absorption refrigerant compositions for use in absorption refrigeration systems. Patent US 4,428,854. 1984.

22. Subhadip Roy, Maiya M. P. Analysis of R134a – DMAC vapor absorption system with add-on components. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 26–35.

23. Bogdanov S. N., Ivanov O. P., Kupriyanova A. V. *Kholodil'naya tekhnika. Svoystva veshchestv* [Refrigeration technology. The properties of substances]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 168 p.

24. Mark Brandon Shiflett, Akimichi Yokozeki. Hybrid vapor compression-absorption cycle. Patent US 7,765,823. 2010.

25. Mark Brandon Shiflett, Akimichi Yokozeki. Hybrid vapor compression-absorption cycle. Patent US 8,707,720. 2014.

26. Konstantinos Kontomaris, Thomas Joseph Leck. Composition comprising 2, 3, 3, 3-tetrafluoro-propene and 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane, chillers containing same and methods of producing cooling therein Patent US 8,765,004. 2014.

27. Andreas Boesmann, Thomas J. S. Schubert. Pairs of working substances for absorption heat pumps, absorption refrigeration machines and heat transformers. Patent US 9,062,899. 2015.

28. Grossman E. R., Zhuravlenko V. Y. Research of the absorption refrigeration machine with using of a solution of methanol and lithium bromide. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration technology], 1968, no. 1, pp. 4–6 (In Russian).

29. Onochie E. U., Ajuwa C. I., Ighodalo O. A. Experimental Solar Thermal Refrigerator Using Methanol as Refrigerant. *International Journal of Engineering and Technology*, 2014, vol. 4, no. 6, pp. 374–386.

Информация об авторах

Мирмов Наум Исакович – доктор наук, научный руководитель. Научно-инженерный центр (2905906, г. Маалот, Р.О.В. 3682, Государство Израиль). E-mail: naumir@yandex.ru

Мирмов Илья Наумович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Институт ядерных исследований РАН (108841, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27, Российская Федерация). E-mail: imirmov@inr.ru

Information about the authors

Mirmov Naum Isakovich – Dr. Science, Scientific Director. Scientific-Engineering Center (P.O.B. 3682, Ma'alot, 2905906, State of Israel). E-mail: naumir@yandex.ru

Mirmov Ilya Naumovich – PhD (Engineering), Senior Researcher. Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Science (27, Fizicheskaya str., 108841, Moscow, Troitsk, Russian Federation). E-mail: imirmov@inr.ru

Поступила 15.01.2017